# ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ







УДК 624.131.54(075.08)

*Научная статья*

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-34-45

## Исследование геотехнических методов устранения кренов сооружений

**А.А. Петраков** ✉, **Н.А. Петракова**, **М.Д. Панасюк**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка, Российская Федерация

✉ a.a.petrakov@donnasa.ru

**Аннотация**

***Введение.*** В настоящее время в процессе освоения новых областей объектами производственно-хозяйственного назначения возникает необходимость в застройке территорий, которые относятся к так называемым сложным инженерно-геологическим и горно-геологическим условиям. Актуальным является решение проблемы обеспечения нормальной эксплуатации зданий и сооружений, возводимых в условиях оползнеопасных территорий, просадочных грунтов, подрабатываемых территорий.

***Материал и методы.*** Исследованы параметры нового геотехнического метода устранения кренов сооружения путем устройства глубокой траншеи по наружному контуру части фундаментной плиты. Грунтовый массив моделируется объемными конечными элементами. Предложены зависимости для определения коэффициентов Пуассона грунта в функции от его прочностных характеристик. Задача решена с учетом последовательности выполнения строительно-монтажных работ. Для этого использован модуль «Монтаж» в ПК «Лира».

***Результаты исследования.*** Реализация геотехнического метода устранения кренов позволяет обеспечить общую устойчивость грунтовых массивов в процессе проведения работ. При его использовании представляется возможным фиксировать максимальные давления на массив в пределах значений, незначительно отличающихся от средних давлений в стадии нормальной эксплуатации сооружения. Также с увеличением глубины компенсационной траншеи практически не изменяются величины вертикальных давлений, что приводит к смещению давлений вглубь массива грунта. Исследованы возможные причины возникновения дополнительных осадок основания при реализации данного метода устранения кренов. Установлено, что данные процессы связаны с уменьшением боковых давлений в грунтовом массиве, обусловленном увеличением податливости основания, а также с повышением краевых давлений под фундаментной плитой.

***Обсуждение и заключение.*** Предложенный метод устранения кренов (геотехнический метод) с разработкой компенсационной траншеи по контуру фундамента здания позволяет минимизировать влияние на общую устойчивость массива и снижает влияние на расположенные в непосредственной близости здания и сооружения в процессе устранения кренов существующих фундаментов. Приведены практические рекомендации по исправлению кренов геотехническим методом.

**Ключевые слова:** крены фундаментов, компенсационные траншеи, геотехнический метод устранения кренов, моделирование боковых давлений в грунтовом массиве, стадии возведения сооружения

**Для цитирования.** Петраков А.А., Петракова Н.А., Панасюк М.Д. Исследование геотехнических методов устранения кренов сооружений. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):34–45. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-34-45

*Original article*

# Study of the Geotechnical Methods of the Structure Tilts Elimination

**Alexander A. Petrakov** ✉, **Natalia A. Petrakova**, **Mark D. Panasyuk**

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, Russian Federation

✉ a.a.petrakov@donnasa.ru

**Abstract**

***Introduction.*** Nowadays, in the frame of development of the new territories, when building the industrial and business facilities, there arises the need to develop the territories having the so-called complicated engineering-geological and mining-geological conditions. Ensuring the normal operation of the buildings and structures built on the territories of the land slide hazard, subsiding soils and on the underworked territories is the problem which is relevant to solve.

***Materials and Methods.*** The parameters of the new geotechnical method of the structure tilts elimination by digging a deep trench along the outer contour of a foundation slab's part are investigated. The soil massif is modeled by the solid finite elements. Correlations for determining the Poisson coefficients of the soil as a function of its strength properties are proposed. The problem is solved taking into account the building and mounting works sequence. For this purpose, the "Mounting works" module of the "Lira" software has been used.

***Results.*** The implementation of the geotechnical method of eliminating the tilts allows ensuring the overall stability of the soil massifs during the works. It provides the opportunity to hold the maximum pressures acting on the massif fixed within the values slightly differing from the mean pressures of the normal operation of the structure. Moreover, deepening the compensation trench causes practically no changes of the vertical pressures values, which leads to the pressures displacements deeper into the soil massif. The possible reasons for the subfoundation extra settlements, in case of implementing this method of tilts elimination, are investigated. It has been found that these processes are related to the lateral pressures reductions in the soil massif due to the subfoundation pliability increase, as well as to the edge pressures rises beneath a foundation slab.

***Discussion and Conclusion.*** The proposed method of tilts elimination (geotechnical method), which includes the design of a compensation trench along the building foundation contour, minimises the impact on the massif's overall stability and reduces the impact on the nearby buildings and structures during eliminating the tilts of the existing foundations. Practical recommendations for correcting the tilts by the geotechnical method are given.

**Keywords:** foundation tilts, compensation trenches, geotechnical method of eliminating the tilts, modeling the lateral pressures in the soil massif, works on mounting the structure

**For citation.** Petrakov AA, Petrakova NA, Panasyuk MD. Study of the Geotechnical Meth-ods of the Structure Tilts Elimination. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):34–45. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-34-45

**Введение.** Проблема исправления кренов сооружений возникает при строительстве и эксплуатации объектов строительства в сложных инженерно-геологических и горно-геологических условиях. К таким условиям относятся: просадочные и набухающие грунты, оползнеопасные и карстоопасные территории, подрабатываемые горными выработками территории и другие[1,2] [1]. В нормах строительного проектирования[3,4,5,6] [2] рассматриваются такие методы устранения кренов сооружений: подъем или опускание частей сооружения гидравлическими системами,

[1] Петраков А.А., Яркин В.В., Кухарь А.В. *Здания и сооружения в сложных инженерно-геологических и горно-геологических условиях.* Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры; 2020. 85 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/99378.html (дата обращения: 04.09.2023).

[2] Ипатов П.П. *Инженерная геология городов*. Томск: Томский политехнический университет; 2010. 252 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/34665.html (дата обращения: 04.09.2023).

[3] СП 22.13330.2016. *Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.* URL: https://docs.cntd.ru/document/456054206 (дата обращения: 02.09.2023).

[4] Franck R., Baunduin C., Driscoll R., Kavvadas , Krebs Ovesen N., Orr T. et al. *Designers Guide to EN 1997–1. Eurocode 7: Geotechnical design — General rules*. London: Thomas Telford Ltd; 2004. 137 p.

[5] СП 394.1325800.2018. *Здания и комплексы высотные Правила эксплуатации.* URL: https://docs.cntd.ru/document/ 552304868 (дата обращения: 04.09.2023).

[6] Петраков А.А., Панасюк М.Д., Петракова Н.А. *Основания и фундаменты: учебное пособие для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство»*. Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры; 2021. 184 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/120031.html (дата обращения: 02.09.2023).

пригруз поверхности основания со стороны, противоположной крену сооружения, разработка грунта под подошвой фундаментов буровыми инструментами. Как правило, производство работ по устранению кренов сооружения связано с большими трудозатратами и временным прекращением эксплуатации сооружения. Довольно часто требуются конструктивные мероприятия по обеспечению прочности сооружения и его фундаментов в процессе устранения его крена. Цель исследования — установить количественные параметры зависимости кренов фундаментной плиты от глубины компенсационной траншеи.

Авторами статьи предложен новый метод устранения кренов сооружений за счет изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива непосредственно под подошвой фундамента. Это достигается изменением граничных условий по глубине грунтового массива в вертикальных сечениях по контуру фундаментной плиты. Для этого устраиваются глубокие траншеи в грунтовом массиве по контуру фундаментной плиты, что приводит к уменьшению до нуля боковых давлений в грунте и его повышенной деформативности в указанных зонах.

**Материалы и методы.** Постановка задачи: на модели грунтового массива возводится жесткая фундаментная плита. Плита загружается собственным весом и распределенной нагрузкой 200 кПа. На половине наружного контура фундаментной плиты производится послойная разработка глубокой траншеи до глубины 20 м. Для учета последовательности реализации геотехнического метода устранения крена фундамента используется модуль «Монтаж» ПК «Лира» [3, 4].

Научная гипотеза: при разработке глубокой траншеи по контуру фундаментной плиты уменьшаются вплоть до нуля боковые давления в грунтовом массиве. Уменьшение боковых давлений в грунтовом массиве приводит к дополнительным осадкам фундаментов.

Для выполнения исследований разработана трехмерная расчетная конечно-элементная модель фрагмента грунтового массива и размещенной на ней жесткой фундаментной плиты [6–10]. Конечно-элементная модель разрабатывается в ПК «Лира». Грунтовый массив, сложенный песчано-глинистыми грунтами с модулем деформации 10 МПа и коэффициентом Пуассона 0,25, принят в расчетной схеме размерами 48($b$)×74($l$)×24($h$) м. Жесткая фундаментная плита изготовлена толщиной 1 м из тяжелого бетона класса по прочности С20/25 и имеет размеры в плане 1×24 м.

Задача решается в ПК «Лира» в упругой постановке. В связи с этим требуется методическая разработка по моделированию в рамках упругой задачи активного давления грунта в стадии предельного равновесия.

Моделирование осуществляется путем сопоставления коэффициента бокового давления в упругой среде и коэффициента бокового давления в предельном состоянии сыпучей среды.[7]

В упругой среде в условиях компрессионного сжатия имеем:

$$\sigma_x = \sigma_y = \xi \cdot \sigma_z; \quad \xi = \nu/(1-\nu), \tag{1}$$

где ν — коэффициент Пуассона.

В предельном состоянии сыпучей среды имеем:

$$\xi = tg^2(45^{\circ} - \varphi/2), \tag{2}$$

где φ — угол внутреннего трения.

Боковое давление в предельном состоянии уменьшается за счет удельного сцепления грунта с:

$$\sigma_x = \sigma_y = -2 \cdot c \cdot tg(45^{\circ} - \varphi/2).$$

Поскольку удельное сцепление грунта существенно зависит от его влажности, при определении боковых давлений грунта им, как правило, пренебрегают.

Сравнивая выражения для определения коэффициентов бокового давления по формулам (1) и (2), получим формулу для определения коэффициента Пуассона грунта, при котором осуществляется моделирование в упругой задаче коэффициента бокового давления в предельном состоянии сыпучей среды:

$$\nu = tg^2(45^{\circ} - \varphi/2)/(1 + tg^2(45^{\circ} - \varphi/2)). \tag{3}$$

В таблице 1 приводятся в функции от угла внутреннего трения грунта значения коэффициентов Пуассона, вычисленные по формуле (3), и соответствующие значения коэффициентов бокового давления — по формулам (1) и (2).



[7] Шапиро Д.М. *Нелинейная механика грунтов.* Москва: Ай Пи Ар Медиа; 2021. 117 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/108312.html (дата обращения: 02.09.2023).

Таблица 1

Результаты моделирования боковых давлений грунта в упругой задаче

| Коэффициенты | Углы внутреннего трения грунта, град. | | |
|---|---|---|---|
| | 30 | 18 | 10 |
| Бокового давления $\xi(\varphi)$ по формуле (2) | 0,33 | 0,54 | 0,70 |
| Пуассона $\nu(\varphi)$ по формуле (3) | 0,25 | 0,35 | 0,41 |
| Бокового давления $\xi(\nu)$ по формуле (1) | 0,33 | 0,54 | 0,70 |

Из таблицы 1 следует, что принятый в исходных данных коэффициент Пуассона грунтового массива 0,25 соответствует песчано-глинистому грунту с углом внутреннего трения $\varphi = 30^{o}$.

Для решения задачи выполнено моделирование 13-ти стадий возведения сооружения. Стадия 1 предполагает создание грунтового массива путем монтажа его элементов. Стадия 2 предполагает монтаж и загрузку фундаментной плиты. Стадии 3–12 реализуют геотехнический метод устранения крена сооружения путем последовательного демонтажа слоев грунта в компенсационной траншее. Характеристика загружений и стадий возведения приведена в таблице 2.

Таблица 2

Загружения и стадии возведения и реализации геотехнического метода устранения кренов фундамента

| Стадии возведения | Нагружения | Схемы стадий возведения |
|---|---|---|
| **Стадия 1**<br>**Монтируемые элементы**<br>Все элементы грунтового массива<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Отсутствуют | **Нагружение 1**<br><br>Нагрузки отсутствуют | |
| **Стадия 2**<br>**Монтируемые элементы**<br>Конечные элементы фундаментной плиты<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Отсутствуют | **Нагружение 2**<br>– собственный вес плиты<br>– распределенная нагрузка на плиту 200 кПа | |
| **Стадия 3**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 0 до 2 м | **Нагружение 3**<br>Нагрузки отсутствуют | |
| **Стадия 4**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 2 до 4 м | **Нагружение 4**<br>Нагрузки отсутствуют | |

| Стадии возведения | Нагружения | Схемы стадий возведения |
|---|---|---|
| **Стадия 5**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 4 до 6 м | **Нагружение 5**<br>Нагрузки отсутствуют | |
| **Стадия 6**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 6 до 8 м | **Нагружение 6**<br>Нагрузки отсутствуют | |
| **Стадия 7**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 8 до 10 м | **Нагружение 7**<br>Нагрузки отсутствуют | |
| **Стадия 8**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 10 до 12 м | **Нагружение 8**<br>Нагрузки отсутствуют | |
| **Стадия 9**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 12 до 14 м | **Нагружение 9**<br>Нагрузки отсутствуют | |

| Стадии возведения | Нагружения | Схемы стадий возведения |
|---|---|---|
| **Стадия 10**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 14 до 16 м | **Нагружение 10**<br>Нагрузки отсутствуют | |
| **Стадия 11**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 16 до 18 м | **Нагружение 11**<br>Нагрузки отсутствуют | |
| **Стадия 12**<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Слой грунта в траншее от 18 до 20 м | **Нагружение 12**<br>Нагрузки отсутствуют | |
| **Стадия 13***<br>**Монтируемые элементы**<br>Отсутствуют<br><br>**Демонтируемые элементы**<br>Отсутствуют | **Нагружение 13**<br>Распределенная нагрузка на плиту 50 кПа | |

**Примечание**: Стадия 13 является завершающей стадией, в которой монтируемые и демонтируемые элементы должны отсутствовать, но должна присутствовать завершающая нагрузка

**Результаты исследования.** Анализу подвержены осадки и крены фундаментной плиты и напряжения в грунтовом массиве.

Численные значения осадок и кренов фундаментной плиты представлены на графиках (рис. 1 и рис. 2). На этих рисунках осадки и крены приведены в функции от глубины компенсационной траншеи для характерных сечений плиты: у левого края ($L$ = 0 м), в центре плиты ($L$ = 12 м) и у правого края ($L$ = 24 м). Анализ графиков на рис. 1, 2 позволяет сделать следующие выводы.

Подтверждена научная гипотеза о том, что при разработке компенсационной траншеи и уменьшении боковых давлений в грунтовом массиве происходит дополнительная осадка основания (рис. 1). Зависимости изменения дополнительной осадки основания от глубины компенсационной траншеи характеризуются градиентами. Градиент или скорость осадки определяется в данном случае как отношение приращения дополнительной осадки к приращению глубины компенсационной траншеи. Как следует из графиков на рис. 1, максимальные градиенты изменения осадок относятся к левому торцу плиты ($L$ = 0). В начале разработки компенсационной траншеи градиент составляет 25 мм/м, а в конце разработки — 8 мм/м, т. е. уменьшается примерно в три раза. Можно предположить, что с определенной отметки глубина компенсационной траншеи не будет оказывать существенного влияния на величины дополнительных осадок основания. Градиент изменения осадки правого торца плиты ($L$ = 24 м) практически равен нулю. Последнее свидетельствует о том, что реализация геотехнического метода устранения кренов не влияет на осадки плиты с противоположной стороны компенсационной траншеи. Градиенты изменения осадок в центре плиты составляют от 5 мм/м в начале процесса до 2 мм/м в конце процесса. Можно полагать, что центр плиты находится в области нейтральной оси.

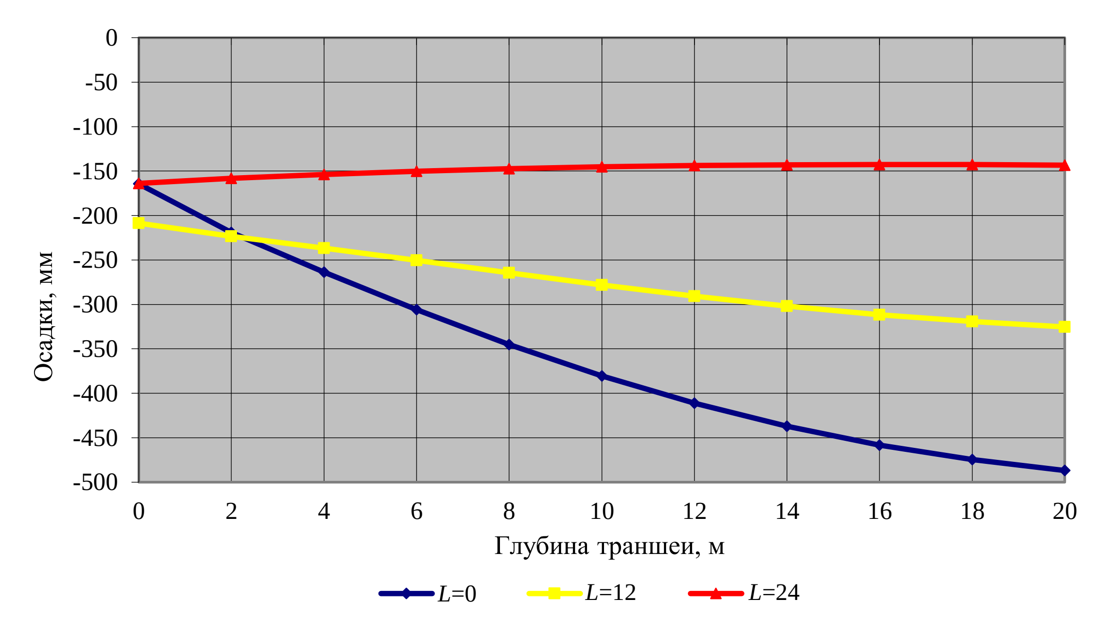



Рис. 1. Осадки основания фундаментной плиты (мм) при устройстве компенсационной траншеи глубиной до 20 м

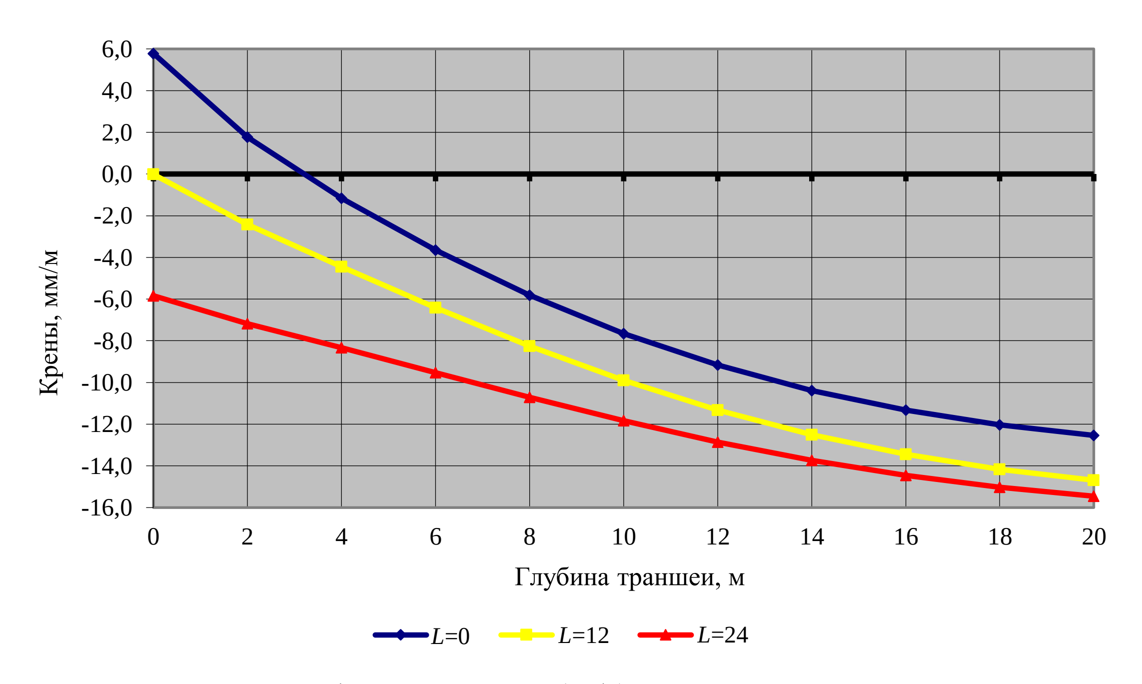
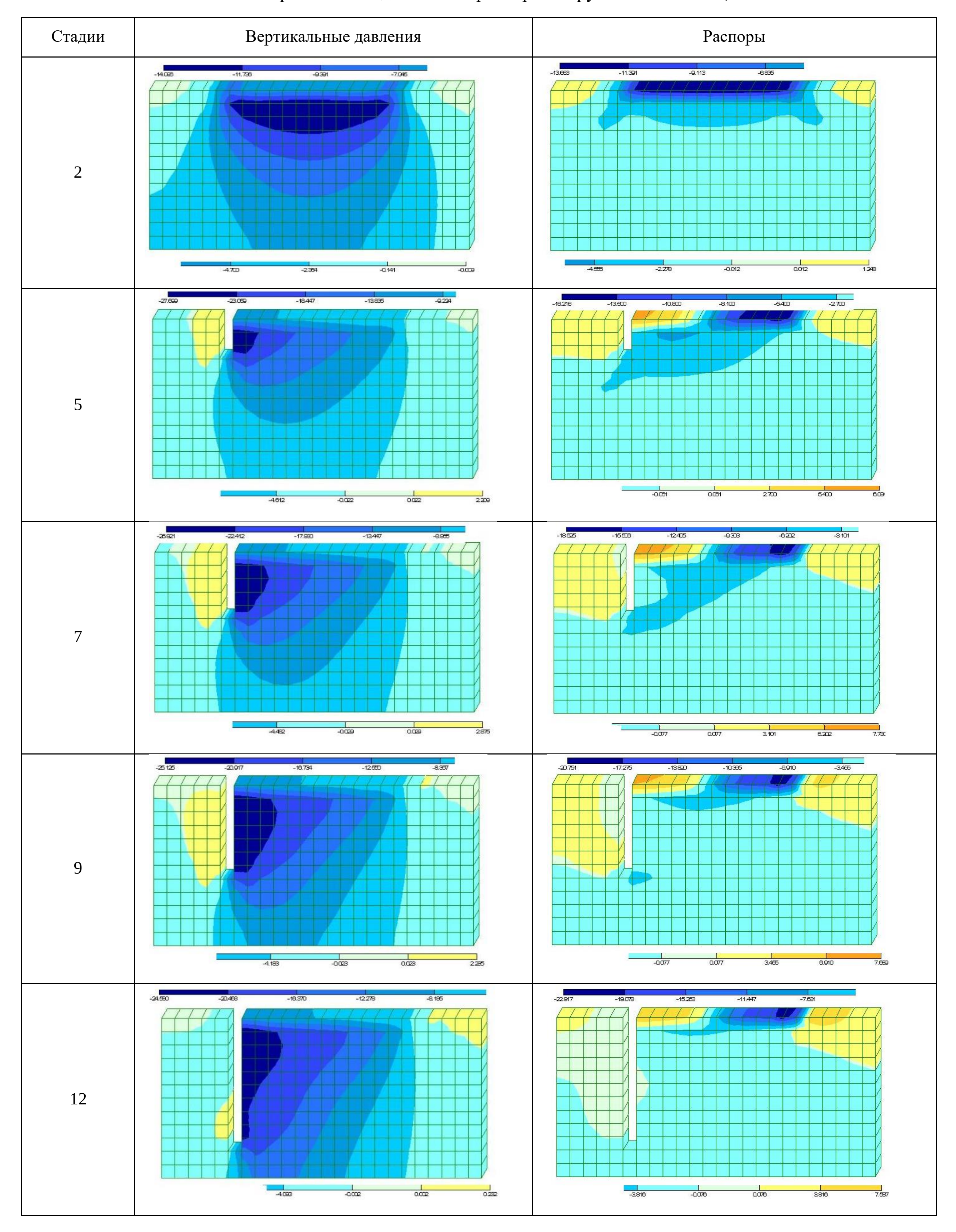



Рис. 2. Крены основания фундаментной плиты (мм/м) при устройстве компенсационной траншеи глубиной до 20 м

Таблица 3

Мозаики вертикальных давлений и распоров в грунтовом массиве, тс/м$^2$



| Стадии | Вертикальные давления | Распоры |
|---|---|---|
| 2 | | |
| 5 | | |
| 7 | | |
| 9 | | |
| 12 | | |

Разность осадок торцов плиты в конце процесса устранения кренов составляет 380 мм, что соответствует среднему градиенту изменения осадки 19 мм/м. Этот параметр можно принять в качестве расчетного при проектировании геотехнических методов устранения кренов сооружений.

В процессе реализации геотехнического метода устранения кренов абсолютные величины изменения кренов фундаментной плиты составили (рис. 2): у торца компенсационной траншеи — 18 мм/м; в центре плиты — 15 мм/м; у торца плиты, противоположного компенсационной траншее — 10 мм/м.

В результате проведенных исследований выявлено, что геотехнический метод устранения кренов сооружений за счет устройства глубокой траншеи по периметру фундаментной плиты является работоспособным и позволяет устранять недопустимые крены сооружений величиной до 18 мм/м.

Мозаики вертикальных давлений и распоров в продольном сечении грунтового массива для характерных стадий возведения сооружения представлены в таблице 3. Численные значения вертикальных давлений в грунтовом массиве представлены на графиках (рис. 3).

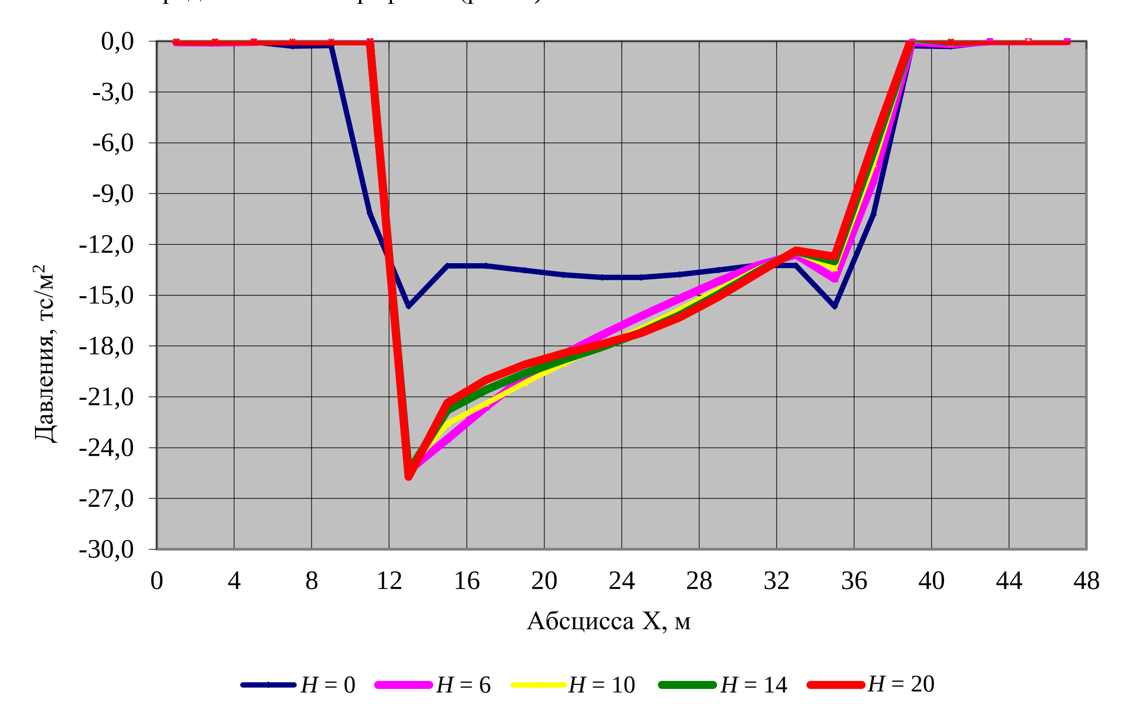



Рис. 3. Давления (тс/м²) в грунте в продольном сечении плиты при разработке грунта в компенсационной траншее глубиной: 0,0 м — стадия 2 ($H$ = 0); 6 м — стадия 5 ($H$ = 6); 10 м — стадия 7 ($H$ = 10); 14 м — стадия 9 ($H$ = 14); 20 м — стадия 12 ($H$ = 20)

Анализ мозаик вертикальных давлений и распоров в грунтовом массиве (таблица 3) и графиков вертикальных давлений на уровне подошвы фундамента (рис. 3) позволяет сделать следующие выводы.

Эпюра отпора грунта при действии нагрузки (рис. 3, $H$ = 0) имеет зоны концентраций давлений по контуру загруженной поверхности. Это объясняет форму деформирования плиты в виде прогиба. При реализации геотехнического метода устранения крена давления в грунте у края плиты со стороны компенсационной траншеи увеличиваются в 1,7 раза. С противоположной стороны плиты давления практически не изменяются. В центре плиты давления увеличиваются в 1,25 раза. Следует отметить, что увеличение вертикальных давлений на основание у края компенсационной траншеи реализуется до ее глубины, равной примерно 6 м. Последующее увеличение глубины траншеи практически не влияет на величины вертикальных давлений и приводит к смещению максимумов давлений в глубину грунтового массива.

Таким образом, причиной возникновения дополнительных осадок плиты при реализации геотехнического метода устранения кренов является как увеличение податливости основания в связи с уменьшением боковых давлений в грунтовом массиве, так и повышение краевых давлений под фундаментной плитой.

Особенностью формирования распоров в грунтовом массиве у края плиты является удерживающее влияние на поверхности основания конструкции фундамента. По этой причине (таблица 3) на всех стадиях возведения сооружения распоры на поверхности основания имеют практически одинаковые значения и свидетельствуют о растяжении грунтового массива в горизонтальном направлении. С увеличением глубины компенсационной траншеи смещаются по глубине максимумы эпюр распоров. Затухание эпюр распоров по глубине грунтового массива от максимальных значений происходит при всех значениях глубины траншеи по практически аналогичным закономерностям. Таким образом, устойчивость стенок компенсационной траншеи обеспечивается армирующим влиянием фундаментов на поверхности основания.

В проведенных исследованиях максимальные давления на грунтовый массив в процессе реализации геотехнического метода устранения кренов фундаментов возрастают не более чем в два раза по сравнению со средними давлениями в стадии нормальной эксплуатации сооружения. Таким образом, в процессе реализации геотехнического метода устранения кренов фундаментов общая устойчивость грунтового массива обеспечена. При завершении процесса устранения кренов фундаментов компенсационная траншея подвергается обратной засыпке с послойным уплотнением грунта.

**Обсуждение и заключение.** Подтверждена научная гипотеза о том, что при разработке компенсационной траншеи по контуру фундаментной плиты и уменьшении боковых давлений в грунтовом массиве происходит дополнительная осадка основания. Такой метод устранения кренов сооружения назван геотехническим. Зависимости изменения дополнительной осадки основания от глубины компенсационной траншеи характеризуются переменными градиентами. Градиент или скорость осадки определяется в этом случае как отношение приращения дополнительной осадки к приращению глубины компенсационной траншеи. По результатам исследований максимальные градиенты изменения дополнительных осадок составляют 25 мм/м в начале процесса и 8 мм/м в конце разработки траншеи. Таким образом, скорость дополнительной осадки основания уменьшается при увеличении глубины компенсационной траншеи примерно в три раза. С определенной отметки глубина компенсационной траншеи не будет оказывать существенного влияния на величины дополнительных осадок основания.

При реализации геотехнического метода устранения кренов существенно увеличиваются вертикальные давления в грунтовом массиве со стороны торца компенсационной траншеи. С учетом этого причиной возникновения дополнительных осадок основания при реализации геотехнического метода устранения кренов является как увеличение податливости основания в связи с уменьшением боковых давлений в грунтовом массиве, так и повышение краевых давлений под фундаментной плитой.

**Список литературы**

1. Яркин В.В. *Моделирование системы «Основание – фундамент – сооружение» в сложных инженерно-геологических условиях: монография.* Петраков А.А. (ред.). Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры; 2020. 392 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/93864.html (дата обращения: 02.09.2023).

2. Belyaev V. Characteristics and problems of the standardization of urban design in the development of urban underground space. *Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019).* 2020;164:04034 https://doi.org/10.1051/e3sconf/20201640403

3. Стрелец–Стрелецкий Е.Б, Журавлев А.В., Водопьянов Р.Ю. *ЛИРА–САПР. Книга I. Основы.* А.С. Городецкий (ред). LIRALAND; 2019. 154 с.

4. Petrakov A.A., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. Solving non-linear problems of the finite over elements by Newton method. *Modern Industrial and Civil Construction.* 2017;13(3):169–178.

5. Petrakov A.A., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. The study of the limiting conditions of the soil massif. The study of equations of state of the theory of plastic flow. *World Geotechnics.* 2017;4(56):20–25.

6. Lertora E., Campanella D., Mandolfino C., Gambaro C., Fratini L., Buffa G. Comparison Between FSW and Bonded Lap Joints — a Preliminary Investigation. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1896(1):110004. https://doi.org/10.1063/1.5008131

7. Huang M.Q., Nini´c J., Zhang Q.B., BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology.* 2021;108:103677. https://doi. org/10.1016/j.tust.2020.103677

8. Mohammadi M.M., Najafi M., Kermanshachi S., Kaushal V., Serajiantehrani R. Factors influencing the condition of sewer pipes: state-of-the- art review. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2020;11(4):03120002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000483

9. Salihu C., Hussein M., Mohandes S.R., Zayed T., Towards a comprehensive review of the deterioration factors and modeling for sewer pipelines: a hybrid of bibliometric, scientometric, and meta-analysis approach. *Journal of Cleaner Production*. 2022;351:131460. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131460

10. Tscheikner-Gratl F., Caradot N., Cherqui F., Leitao J.P., Ahmadi M., Langeveld J.G. et al. Sewer asset management — state of the art and research needs. *Urban Water Journal*. 2019;16(9):662–675. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1713382

**References**

1. Yarkin VV. *Modeling the "Subfoundation — Foundation — Structure" System in the Complicated Engineering-Geological Conditions. Monograph*. Petrakov AA (ed.). Makeyevka: Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture; 2020. 392 p. URL: https://www.iprbookshop.ru/93864.html (In Russ.) (assecced: 02.09.2023).
2. Belyaev V. Characteristics and problems of the standardization of urban design in the development of urban underground space. *Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019).* 2020;164:04034 https://doi.org/10.1051/e3sconf/20201640403
3. Strelets–Streletsky EB, Zhuravlev AV, Vodopyanov RY. *LIRA–SAPR. Book I. Fundamentals*. Gorodetsky AS (ed.). LIRALAND; 2019. 154 p. (In Russ.).
4. Petrakov A.A., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. Solving non-linear problems of the finite over elements by Newton method. *Modern Industrial and Civil Construction.* 2017;13(3):169–178.
5. Petrakov A.A., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. The study of the limiting conditions of the soil massif. The study of equations of state of the theory of plastic flow. *World Geotechnics.* 2017;4(56):20–25.
6. Lertora E., Campanella D., Mandolfino C., Gambaro C., Fratini L., Buffa G. Comparison Between FSW and Bonded Lap Joints — a Preliminary Investigation. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1896(1):110004. https://doi.org/10.1063/1.5008131
7. Huang M.Q., Nini´c J., Zhang Q.B., BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;108:103677. https://doi. org/10.1016/j.tust.2020.103677
8. Mohammadi M.M., Najafi M., Kermanshachi S., Kaushal V., Serajiantehrani R. Factors influencing the condition of sewer pipes: state-of-the- art review. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2020;11(4):03120002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000483
9. Salihu C., Hussein M., Mohandes S.R., Zayed T., Towards a comprehensive review of the deterioration factors and modeling for sewer pipelines: a hybrid of bibliometric, scientometric, and meta-analysis approach. *Journal of Cleaner Production*. 2022;351:131460. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131460
10. Tscheikner-Gratl F., Caradot N., Cherqui F., Leitao J.P., Ahmadi M., Langeveld J.G. et al. Sewer asset management — state of the art and research needs. *Urban Water Journal*. 2019;16(9):662–675. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1713382

**Поступила в редакцию** 10.09.2023
**Поступила после рецензирования** 22.09.2023
**Принята к публикации** 06.10.2023

*Об авторах:*

**Петраков Александр Александрович,** заведующий кафедрой «Основания, фундаменты, подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286123, РФ, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2), доктор технических наук, профессор, a.a.petrakov@donnasa.ru

**Петракова Наталья Александровна,** доцент кафедры «Основания, фундаменты, подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286123, РФ, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2), кандидат технических наук, ORCID, n.o.petrakova@donnasa.ru

**Панасюк Марк Дмитриевич,** ассистент кафедры «Основания, фундаменты, подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286123, РФ, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2), магистр, m.d.panasuk@donnasa.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

Петраков А.А. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, формирование выводов.
Петракова Н.А. — подготовка текста, формирование выводов.
Панасюк М.Д. — выполнение численных исследований.

*Конфликт интересов:* авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Received** 10.09.2023
**Revised** 22.09.2023
**Accepted** 06.10.2023

*About the Authors:*

**Alexander A. Petrakov**, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Subfoundations, Foundations, Subsurface Structures Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (2, Derzhavina str., Makeyevka, 286123, RF), a.a.petrakov@donnasa.ru

**Natalia A. Petrakova,** Cand.Sci. (Engineering.), Associate Professor of the Subfoundations, Foundations, Subsurface Structures Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (2, Derzhavina str., Makeyevka, 286123, RF), ORCID, n.o.petrakova@donnasa.ru

**Mark D. Panasyuk,** MEng., Assistant of the Subfoundations, Foundations, Subsurface Structures Department, Donbass National Academy of Civil Engi-neering and Architecture (2, Derzhavina str., Makeyevka, 286123, RF), m.d.panasuk@donnasa.ru

*Claimed contributorship:*
Petrakov AA — formulating the main concept, aims and objectives of the re-search, formulating the conclusions.
Petrakova NA — text preparation, formulating the conclusions.
Panasyuk MD — carrying out the numerical research.

*Conflict of interest statement:* the authors do not have any conflict of interest.

*All authors have read and approved the final manuscript.*